

Dualité onde-corpuscule pour un photon unique

D'après l'expérience de GRANGIER P., ROGER G. et ASPECT A.

Anouk AZAÏS, Jeanne DUBOEUF, Noé LE LAY, Maël LECOEUCE, Helwan OULYADI

Encadrants : Benjamin VEST (MVP), Cédric LEJEUNE, Thierry AVIGNON

- **Objectifs :** Illustrer la dualité onde-corpuscule de la lumière grâce à l'observation de franges d'interférence de photons uniques et de mesures de corrélation + Réaliser une source de photons uniques annoncés à partir d'une source de photons jumeaux.
- **Enjeux :** Enrichir un TP de Master 2 QLMN portant sur l'effet Hong-Ou-Mandel sans modifier l'expérience existante + Réaliser un nouveau montage électronique pour remplacer les circuits de coïncidences obsolètes.

Source de photons annoncés

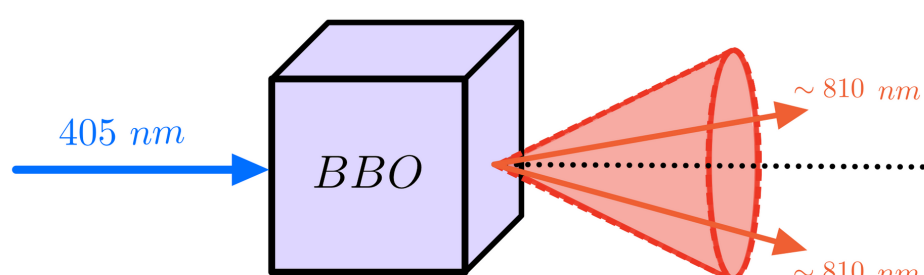


Figure 1 : Effet d'un cristal non linéaire sur un faisceau laser incident

On émet des paires de photons jumeaux à 810 nm par conversion paramétrique descendante (SPDC).

Les deux flux de photons issus du BBO sont corrélés et sont dans une superposition d'états qui se décompose sur la base des états nombre.

$$\bullet |\psi_{405}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c_i |i\rangle \quad \bullet |\psi_{\text{photon unique}}\rangle = |1\rangle \quad \bullet |\psi_{810}\rangle = \sum_{i=0}^{+\infty} c'_i |i\rangle_1 \otimes |i\rangle_2$$

Pour obtenir une source de photons uniques, on procède par conditionnement. Un événement de détection sur la voie d'annonce projette l'état du deuxième faisceau sur l'état photon unique. Mesurer des coïncidences revient à s'assurer de n'observer le champ que quand il se trouve dans l'état $|1\rangle$. Sans mesure de coïncidences, le champ reste dans une superposition d'états.

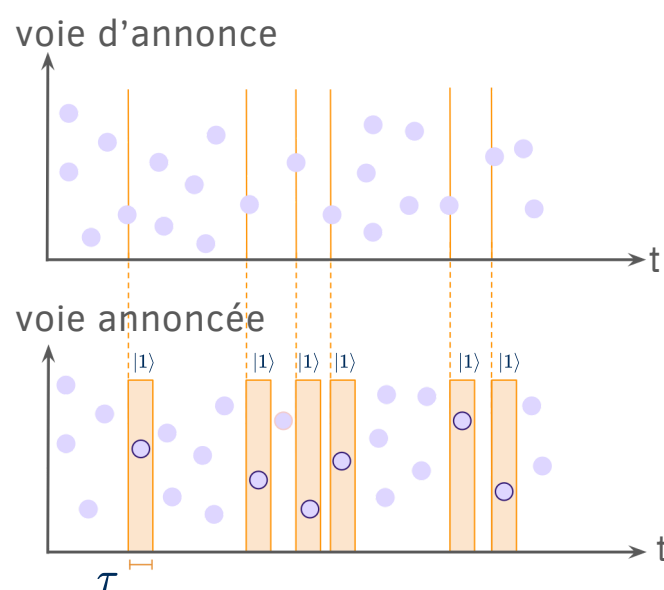
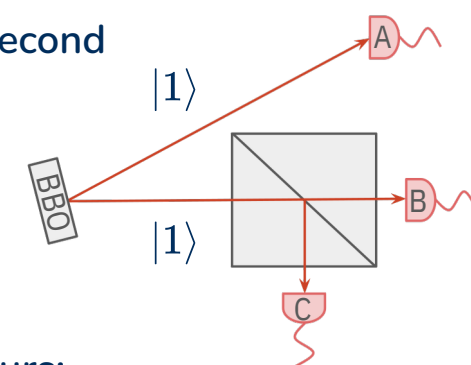


Figure 2 : Distribution temporelle d'une source de photons jumeaux

Le photon : onde et corpuscule

Montrer l'aspect corpusculaire du photon unique

- **Idée :** Un photon annoncé par la voie A ne peut être détecté que par B ou C, jamais les deux.
- **Méthode :** mesurer le coefficient de corrélation du second ordre $g^{(2)}$, qui dépend du nombre de coups et de coïncidences détectées entre les voies. Une coïncidence correspond à la détection simultanée par 2 ou 3 détecteurs d'un photon.



- Pour une source de photons uniques avec 3 détecteurs:

$$\rightarrow g^{(2)}(0) = 0 \quad \text{car } N_{ABC} = 0$$

$$\rightarrow g^{(2)}(0) < 0.5 : \text{caractéristique des sources quantiques.}$$

$$g^{(2)}(0) = \frac{N_{ABC} N_A}{N_{AB} N_{AC}}$$

- Pour un $g^{(2)}$ à 2 détecteurs B et C : $g^{(2)}(0) = 1$
 $\rightarrow$ Sans conditionnement, le champ est parfois dans d'autres états que $|1\rangle$.
 $\rightarrow$ On mesure une source de statistique poissonnienne.

Montrer l'aspect ondulatoire du photon unique

- **Idée :** La division d'une onde en deux fait apparaître des interférences à la recombinaison.
- **Méthode :** le photon annoncé est placé dans un interféromètre.
 $\rightarrow$ Le photon se trouve dans une superposition d'états. La différence de marche entre les bras modifie la probabilité d'observer des coïncidences entre détecteur d'annonce A et détecteur B après recombinaison par la seconde séparatrice.

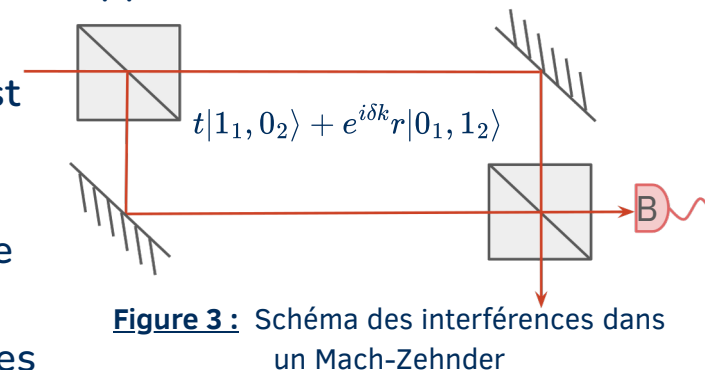


Figure 3 : Schéma des interférences dans un Mach-Zehnder

$$N_{AB} = N_{AB}^{\max} \times \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) \right)$$

Montage expérimental

Le premier photon, dit d'annonce, est envoyé vers la photodiode A. L'autre photon est envoyé dans un interféromètre de Michelson.

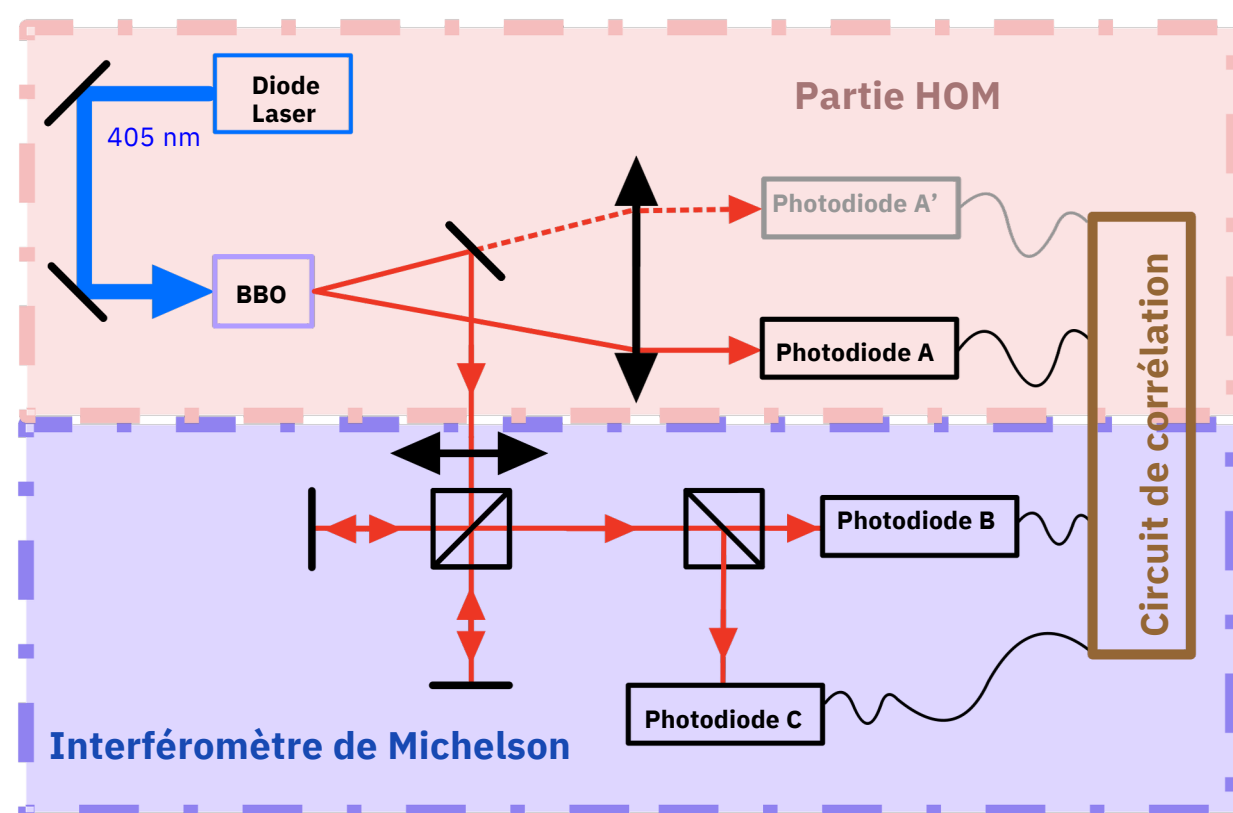


Figure 4 : Schéma du montage optique

Résultats obtenus

Le nombre de coïncidences AB est mesuré en fonction du déplacement de la cale piézoélectrique, ce qui correspond à la modification de la différence de marche introduite entre les bras du Michelson. On observe alors un motif d'interférence, signe du caractère ondulatoire du photon.

$\rightarrow$ Le photon est une onde !

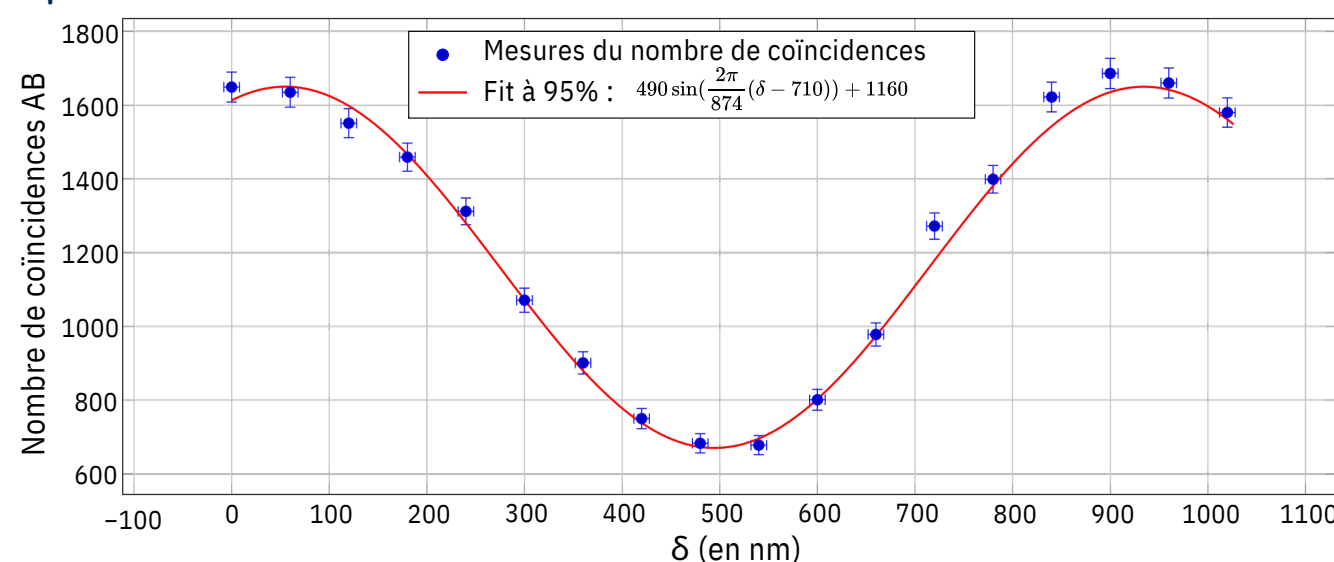


Figure 5 : Tracé du nombre de coïncidences entre les voies A et B en fonction de la différence de marche (Temps d'intégration : 5s)

Résultat expérimental du $g^{(2)}$

- à 3 détecteurs : $g^{(2)}(0) = (0, 18 \pm 0, 04)$
- à 2 détecteurs : $g^{(2)}(0) = (1, 07 \pm 0, 01)$

Limite : Des photons issus de plusieurs paires peuvent générer des coïncidences accidentelles dans la fenêtre de détection.

$\rightarrow$ Le photon est un corpuscule !

$$\lambda = (872 \pm 18) \text{ nm}$$

$$\text{Contraste : } (44, 4 \pm 0, 7) \%$$



Bilan Carbone : 207 kg CO₂ équivalent
pour l'achat du nouveau matériel



QuantEdu
FRANCE



quantum | université
PARIS-SACLAY

- Thorlabs. EDU-QOP1 – Quantum Optics Educational Kit. Chapters 3–4
- Grangier.P, Roger.G et Aspect.A (1986) Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. *Europhys. Lett.*, 1 (4), p. 173-179
- Burton A. Betchart (2004) A Test of Bell's Inequality for the Undergraduate Laboratory.